

DOI: 10.7667/PSPC162117

基于模型识别的消弧线圈接地系统单相接地选线方法

徐铭铭¹, 高淑萍², 常仲学³, 马建伟¹, 陈伟⁴, 宋国兵³

(1. 国网河南省电力公司电力科学研究院, 河南 郑州 450052; 2. 西安科技大学电气与控制工程学院, 陕西 西安 710054; 3. 西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049; 4. 河南恩湃电力技术有限公司, 河南 郑州 450000)

摘要: 基于模型识别的继电保护思想提出了一种消弧线圈接地系统单相接地故障选线新方法。在特征频带内将线路等效成电容模型, 首先利用故障暂态信号通过最小二乘方法求解出各出线的电容初值, 然后用故障稳态信号求解电容值并与电容初值比较。由于故障线路不符合所建立的电容模型, 模型误差较大; 健全线路基本符合所建立的电容模型, 模型误差接近于 0, 基于此特点就可以实现故障线路的识别。该方法具有自举性, 通过仿真和录波数据验证了所提方法的有效性。

关键词: 配电网; 故障选线; 模型识别; 最小二乘拟合算法

Model recognition based single-phase earthed faulty line selection method of Petersen coil grounded system

XU Mingming¹, GAO Shuping², CHANG Zhongxue³, MA Jianwei¹, CHEN Wei⁴, SONG Guobing³

(1. State Grid Henan Electric Power Research Institute, Zhengzhou 450052, China;

2. School of Electrical and Control Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China;

3. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

4. Henan EPRI Electric Technology Co., Ltd., Zhengzhou 450000, China)

Abstract: A new method of faulty line selection method based on model recognition for Petersen coil grounded system is presented. The equivalent circuit of every line is modeled as capacitance during fault characteristic frequency band. The initial value of capacitance is calculated by transient information through least square fitting. Then capacitance value calculated by the steady-state signal is compared with the initial value. It is found that fault line does not meet the established capacitance model and model error is large; while the sound line is basically in accordance with the established capacitance model and the model error is close to zero. Based on these characteristics, faulty line selection criteria is constructed. This method has a bootstrap characteristic. Simulation and field recording data show that the proposed method is feasible.

This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China "Research of Key Technologies for Fast Handling of Distribution Network Single-phase Grounding Fault Considering Personal Safety Protection".

Key words: distribution network; fault line selection; model recognition; least square fitting

0 引言

消弧线圈接地系统的单相接地选线问题一直是研究的热点和难点, 但依然没有得到较好地解决。目前选线的方法主要是基于故障暂态电气量的差别构造判据^[1-8]。文献[1-2]指出在特征频带内故障线路的零序电流幅值最大且与健全线路的零序电流相位相反。文献[3-4]通过采用相关分析的数学工具, 比

较各出线零序电流与零序电压导数之间的相关性选线和区段定位; 文献[5-6]将小波分析法引入到选线中, 算法比较复杂。文献[7]在故障时通过调整消弧线圈的补偿度并利用零序电压和零序电流的相位差别实现选线。文献[8]首先通过频率分解后基于各出线暂态零序电流幅值与所有出线零序电流幅值和之间的关系自适应确定选线频带, 然后基于各出线零序电流的幅值关系选择故障线路。文献[9]给出了一种配电网单相接地选线的频带自适应获取方法。文献[10]给出了瞬时负序分量的提取方法并基于负序分量幅值和相位的差别实现了选线。

基金项目: 国家电网公司科技项目“考虑人身安全防护的配电网单相接地故障快速处理关键技术研究”

鉴于配电网运行的复杂性，暂态电气量易受过渡电阻等的影响，所以故障暂态信息往往不能充分识别故障线路^[11]。文献[12]综合了暂态量和稳态量进行选线，但主要是应对现场电流互感器极性接错的问题。随着继电保护技术的发展，相关学者认为故障的本质是网络拓扑结构的变化，基于此提出了利用故障全域信息的参数识别和模型识别继电保护新原理^[13-14]，且在小电流接地选线中分别基于频域和时域参数识别原理实现了选线，该方法从理论上讲具有不受过渡电阻影响的特点，所以具有较好的应用前景^[15-16]。

本文综合故障暂态信息和稳态信息，基于模型识别的继电保护思想，首先建立了故障线路和健全线路的模型，并通过模型误差构造选线判据，实现了消弧线圈接地系统的单相接地选线。大量仿真证明该方法能够在高过渡电阻和故障初相角很小的情况下可靠选线，具有较好的应用前景。

1 模型的建立

以两条出线的消弧线圈接地系统为例，当一条线路发生故障后等效零序网络如图 1 所示。

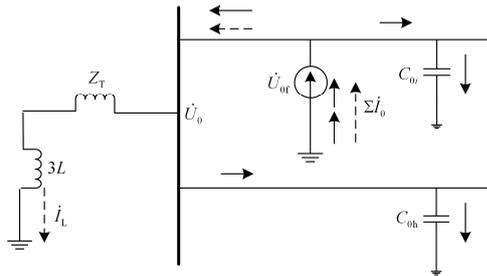


图 1 零序网络示意图

Fig. 1 Zero-sequence network diagram

图中 $3L$ 表示消弧线圈电感， Z_T 为接地变压器的等效阻抗， C_{0f} 为故障线路的对地等效电容， C_{0h} 为健全线路的对地等效电容。 \dot{U}_0 为母线的零序电压， \dot{U}_{or} 为故障点的等效零序电压源， \dot{I}_L 为流经消弧线圈的电流， $\Sigma \dot{I}_0$ 为故障点的零序电流。 $\Sigma \dot{I}_0$ 等于全网线路对地电容电流和流经消弧线圈的电感电流之和。

文献[16]对配网线路 π 模型的适用频带做了具体分析，根据其分析可知，在一定截止频率之下的频带内，集中参数 π 模型和分布参数模型的相频、幅频特性非常接近，且均呈现容性。除了首段容性频带以外不再存在公共的容性频带，所以可以将线路的首段容性频带选定为适用频带，只不过随着输电线路的增长适用频带的上限截至频率将逐渐下

降。事实上在一定的频带内可将线路进一步简化为简单的对地电容模型^[17]，在故障零序网络中以及规定的零序电压电流方向下，集电线非故障线路、故障线路可以等效为图 2 和图 3。

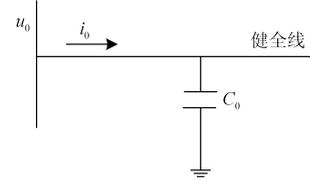


图 2 健全线路等效电路

Fig. 2 Equivalent model of healthy line

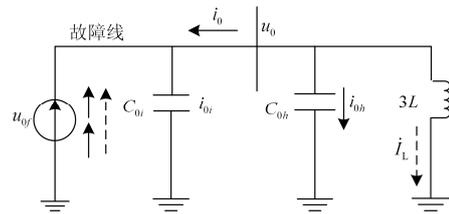


图 3 故障线路等效电路

Fig. 3 Equivalent model of fault line

规定线路的零序电流正方向为从母线流向线路，则图 2 所示的健全线路满足

$$i_0 = C_0 \frac{du_0}{dt} \quad (1)$$

对于如图 3 所示的故障线路等效电路，由于通常情况下采用工频过补偿方式运行，所以工频下故障线路的零序电流为感性，且从线路流向母线，从而健全线路和故障线路的工频零序电流方向本质上是相同的。但是随着频率增大，消弧线圈的补偿作用减弱，电感电流较小，线路的电容电流增大，当高于某一频率后，故障线路的零序电流呈现容性，方向为从线路流向母线，与健全线路相反。通常在消弧线圈接地系统中这一频率保守取 150 Hz 即可满足要求。在这种情况下图 3 可以等效成如图 4 所示的电路图，零序电压和零序电流的关系满足

$$i_0 = -C_0 \frac{du_0}{dt} \quad (2)$$

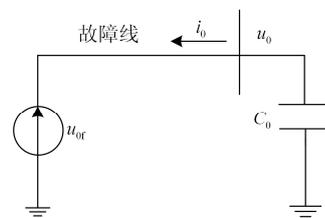


图 4 故障线路电容等效电路

Fig. 4 Equivalent capacitor model of fault line

至此就建立了健全线路和故障线路的等效模型, 然后通过求解模型参数, 构造模型误差判据就可以实现故障选线。

2 选线方案实现

2.1 基本原理

由上面的分析可知, 故障线路在特定频带内才能等效为负电容模型, 而当故障进入稳态时, 故障线路将不能等效为负电容模型, 而后健全线路一直满足正电容模型。根据模型识别继电保护原理的基本思想, 首先在故障初始每条线路分别利用式(1)、式(2)在线识别健全线路、故障线路等效模型的电容初值, 然后利用故障稳态值求取电容值, 通过相对误差的大小来区分故障线路和健全线路。采用最小二乘离散化后识别电容模型的公式为^[18]

$$C_0 = \frac{\sum_{k=1}^H i_0(k) \frac{du_0}{dt}(k)}{\sum_{k=1}^H \left[\frac{du_0}{dt}(k) \right]^2} \quad (3)$$

本文的采样频率取 10 kHz, H 为识别电容初值所用的采样点数, 即数据窗长, 可取 10 ms。

2.2 装置的启动

由上面的分析可知电容初值的识别需要知道故障发生时刻, 单相接地故障会产生比较大的零序电压, 可由此来构造单相故障启动判据为

$$U_0 > U_{0set} \quad (4)$$

考虑到三相不平衡电压以及互感器传变误差, 一般取为 0.15 倍的额定电压, 即 $U_{0set} = 0.15U_N$, U_N 为额定相电压。

2.3 选线判据

根据模型识别的基本原理, 将式(3)识别出的电容初值代入式(5), 采用 10 ms 后的零序电压和电流采样值计算每条线路的模型误差, 如果模型误差大于整定值, 则为故障线路; 如果模型误差小于整定值, 则为健全线路; 如果所有出线的模型误差都小于整定值, 则可判定为母线发生故障。

$$\xi_{\text{误差}} = \frac{\sum_{k=1}^N \left| i_0(k) - C_0(k) \frac{du_0}{dt}(k) \right|}{\sum_{k=1}^N \left| i_0(k) \right| + \left| C_0(k) \frac{du_0}{dt}(k) \right|} \quad (5)$$

考虑现场噪声的影响, 模型误差的 ξ_{set} 可整定为 0.5。

2.4 选线流程

根据以上分析可以看出, 基于模型识别的选线方法首先判断是否发生接地故障, 如果发生, 通过

零序电压和电流识别电容初值, 然后计算模型误差, 从而实现故障选线, 具体流程图如图 5 所示。

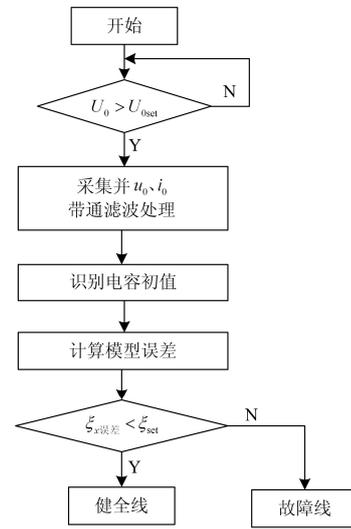


图 5 故障选线流程图

Fig. 5 Fault line selection flowchart

3 仿真和录波数据验证

3.1 仿真验证

基于 PSCAD 建立如图所示的配电网仿真模型, 具体参数见附录。仿真数据采样率为 10 kHz。

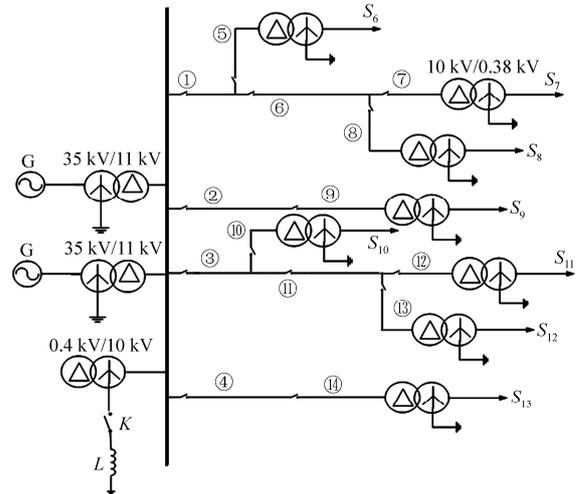


图 6 仿真模型拓扑结构

Fig. 6 Topological structure of simulation model

通过在线路 1 设置不同过渡电阻、线路 2 设置不同故障时刻的单相接地故障, 考虑现场噪声对本文方法的影响, 在仿真所得的零序电压和电流中叠加白噪声, 信噪比为 100 dB, 具体测试结果如下。

图 7 给出了区段 1 经 50Ω 过渡电阻、故障初相角为 45° 的选线结果。可以看出线路 1 的模型误差基本为 1, 大于整定值, 其余线路的模型误差小

于整定值，所以证明选线结果的正确性。图 8 给出了母线经 50 Ω 过渡电阻、故障初相角为 45°时的选线结果。可以看出所有出线的模型误差都小于整定值，所以所有线路都确定为健全线，因此母线故障。

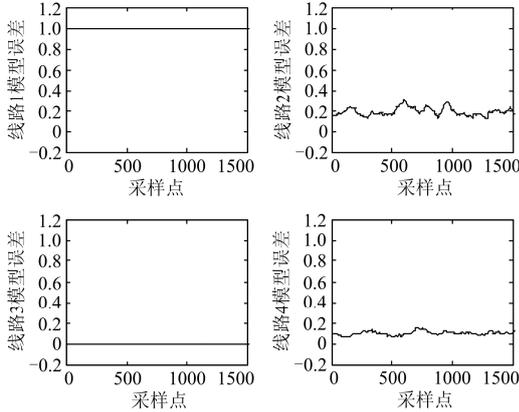


图 7 线路 1 故障时的选线结果

Fig. 7 Fault-line selection results when fault at line 1

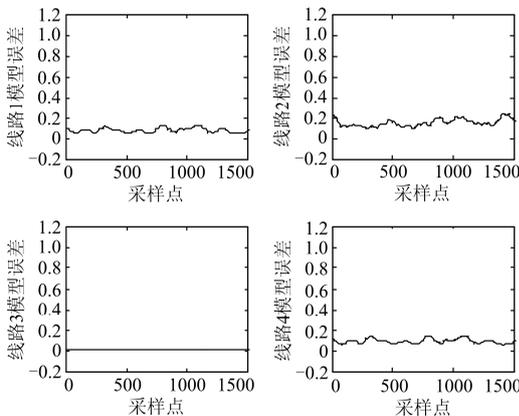


图 8 母线故障时的选线结果

Fig. 8 Fault-line selection results when fault at bus

在区段 8 设置单相接地故障，故障初相角为 90°，改变过渡电阻，选线的结果如表 1 所示。在区段 9 设置单相接地故障，在过渡电阻为 50 Ω 时改变故障初相角，选线结果如表 2 所示。

表 1 不同过渡电阻下各出线的模型误差及选线结果

Table 1 Model error of all lines and fault-line selection results when transition resistance is different

过渡电阻/Ω	模型误差				选线结果
	1	2	3	4	
0	0.9984	0.1798	0.0186	0.1051	线路 1
50	0.9985	0.2731	0.0167	0.1651	线路 1
500	0.9983	0.0984	0.013	0.0709	线路 1
1000	0.9984	0.3918	0.0129	0.1209	线路 1
2000	0.9983	0.4164	0.0145	0.1099	线路 1
5000	0.9965	0.7965	0.0136	0.3357	线路 1

表 2 不同故障初相角下各出线的模型误差及选线结果

Table 2 Model error of all lines and fault-line selection results when initial phase angle is different

初相角(°)	模型误差				选线结果
	1	2	3	4	
0	0.0208	0.9846	0.0086	0.0806	线路 2
30	0.0139	0.9805	0.0138	0.1032	线路 2
45	0.0211	0.9801	0.0139	0.0877	线路 2
90	0.0478	0.9798	0.0138	0.0827	线路 2

从表 1 和表 2 的仿真结果可以看出，本文提出的基于模型识别的消弧线圈选线方法可以在故障初相角较小和高阻接地故障下可靠选线。

3.2 录波数据验证

为了进一步验证本文的方法，选取某含有 6 条出线的变电站发生单相接地故障的录波数据进行验证，录波数据的采样率为 5 kHz，其中故障点在第 4 条。6 条出线的模型误差如图 9 所示，可以看出本文的方法可以可靠选出故障线路。

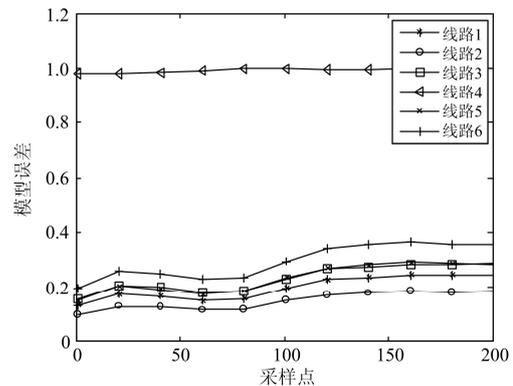


图 9 录波数据验证结果

Fig. 9 Fault-line selection results using field recording data

4 结论

本文在分析消弧线圈接地系统单相接地故障特征的基础上，首先建立了故障线路和健全线路的等效模型，然后综合暂态和稳态故障信息提出了基于模型识别原理的选线方法。指出在特征频带内可以将线路等效成电容模型，故障线路不符合所建模型，所以模型误差较大，健全线路符合所建模型，所以模型误差很小，基本为 0。基于此特点构造了模型识别的选线判据。本文的方法具有自举性，仿真和录波数据表明该方法有效。

附录

35 kV 变电站有两回进线，通过两台主变压器配出的 10 kV 系统为单母线形式；母线带有 4 条馈

线, 出线上各区域的编号如图中所示。其中, 区域 1、3、5、10 为电缆, 区域 2、9、11、12、13 为架空绝缘线, 区域 4、6、7、8、14 为架空裸导线。消弧线圈装在所用变中性点上。开关 K 打开时, 系统为中性点不接地系统; 开关 K 闭合则为消弧线圈接地系统, 过补偿度取为 10%。

各区域线路长度分别为: $L_1=5.1$ km, $L_2=4$ km, $L_3=3.8$ km, $L_4=7.5$ km, $L_5=4$ km, $L_6=10$ km, $L_7=0.1$ km, $L_8=20$ km, $L_9=4$ km, $L_{10}=3.2$ km, $L_{11}=10$ km, $L_{12}=5$ km, $L_{13}=3$ km, $L_{14}=7.5$ km。

电缆参数为: $r_1=0.157$ Ω /km, $x_1=0.076$ Ω /km, $b_1=132 \times 10^{-6}$ S/km; $r_0=0.307$ Ω /km, $x_0=0.304$ Ω /km, $b_0=110 \times 10^{-6}$ S/km。架空绝缘线参数为: $r_1=0.27$ Ω /km, $x_1=0.352$ Ω /km, $b_1=3.178 \times 10^{-6}$ S/km; $r_0=0.42$ Ω /km, $x_0=3.618$ Ω /km, $b_0=0.676 \times 10^{-6}$ S/km。区域 7、8 中裸导线参数为: $r_1=0.91$ Ω /km, $x_1=0.403$ Ω /km, $b_1=2.729 \times 10^{-6}$ S/km; $r_0=1.06$ Ω /km, $x_0=3.618$ Ω /km, $b_0=0.672 \times 10^{-6}$ S/km。其他区域裸导线参数为: $r_1=0.63$ Ω /km, $x_1=0.392$ Ω /km, $b_1=2.807 \times 10^{-6}$ S/km; $r_0=0.78$ Ω /km, $x_0=3.593$ Ω /km, $b_0=0.683 \times 10^{-6}$ S/km。两台主变参数分别为: $S_N=2$ MVA, $P_k=20.586$ kW, $U_k\%=6.37\%$, $P_0=2.88$ kW, $I_0\%=0.61\%$; $S_N=2$ MVA, $P_k=20.591$ kW, $U_k\%=6.35\%$, $P_0=2.83$ kW, $I_0\%=0.62\%$ 。令各配电变压器与所连接区域编号一致, 则它们的容量分别为: $S_{5N}=50$ kVA, $S_{7N}=500$ kVA, $S_{8N}=200$ kVA, $S_{9N}=1$ MVA, $S_{10N}=100$ kVA, $S_{12N}=1$ MVA, $S_{13N}=400$ kVA, $S_{14N}=630$ kVA。为简单起见, 各配电变压器所带负荷统一为变压器容量的 80%, 功率因数为 0.85。

参考文献

- [1] 王伟, 焦彦军. 暂态信号特征分量在配网小电流接地选线中的应用[J]. 电网技术, 2008, 32(4): 96-100.
WANG Wei, JIAO Yanjun. Application of characteristics of transient signal in grounded wire detection of ineffectively earthed distribution systems[J]. Power System Technology, 2008, 32(4): 96-100.
- [2] 揭林玲, 唐昆明, 张太勤, 等. 基于暂态信号相频特性的小电流接地选线研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(3): 50-54.
JIE Linling, TANG Kunming, ZHANG Taiqin, et al. Research on ground fault detection based on phase-frequency characteristics of transient signals[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(3): 50-54.
- [3] 郭光孟, 吕剑飞, 王玉荣, 等. 基于改进相关系数的配电网故障定位方法[J]. 陕西电力, 2016, 44(7): 56-60.
GUO Guangmeng, LÜ Jianfei, WANG Yurong, et al. Research on fault location of distribution networks based on improved correlation coefficient method[J]. Shaanxi Electric Power, 2016, 44(7): 56-60.
- [4] 刘谋海, 方涛, 姜运, 等. 基于暂态主频分量相关性分析的故障选线方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(2): 74-79.
LIU Mouhai, FANG Tao, JIANG Yun, et al. A new correlation analysis approach to fault line selection based on transient main-frequency components[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(2): 74-79.
- [5] 陈博博, 屈卫锋, 杨宏宇, 等. 小电流接地系统单相接地综合电弧模型与选线方法的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(16): 1-7.
CHEN Bobo, QU Weifeng, YANG Hongyu, et al. Research on single phase grounding arc model and line selection for neutral ineffectively grounding system[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(16): 1-7.
- [6] 刘洋, 郭威, 邢春阳, 等. 基于双树复小波变换的配电网故障选线[J]. 广东电力, 2016, 29(12): 121-126.
LIU Yang, GUO Wei, XING Chunyang, et al. Fault line selection for power distribution network based on dual-tree complex wavelet transform[J]. Guangdong Electric Power, 2016, 29(12): 121-126.
- [7] 马天祥, 程肖, 杜旭浩, 等. 配电自动化系统中单相接地故障定位新方法[J]. 陕西电力, 2016, 44(8): 67-70, 75.
MA Tianxiang, CHENG Xiao, DU Xuhao, et al. A new location method of single phase to earth fault in distribution automation system[J]. Shaanxi Electric Power, 2016, 44(8): 67-70, 75.
- [8] 张保会, 赵慧梅, 张文豪, 等. 基于特征频带内暂态零序电流特点的配电网单相接地故障选线方法[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(13): 5-10.
ZHANG Baohui, ZHAO Huimei, ZHANG Wenhao, et al. Faulty line selection by comparing the amplitudes of transient zero sequence current in the special frequency band for power distribution networks[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(13): 5-10.
- [9] 杨健翔, 常仲学, 豆敏娜, 等. 一种配网单相接地选线的频带自适应获取方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(15): 60-66.
YANG Jianxiang, CHANG Zhongxue, DOU Minna, et al. A novel frequency band self-adaptive selection method of fault line selection in distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(15): 60-66.

- [10] 严敏敏, 陈平, 周新军, 等. 基于瞬时负序分量的小电流接地选线[J]. 广东电力, 2017, 30(3): 87-93.
YAN Minmin, CHEN Ping, ZHOU Xinjun, et al. Fault line selection for small current based on instantaneous negative-sequence component[J]. Guangdong Electric Power, 2017, 30(3): 87-93.
- [11] 朱晓娟, 林圣, 张姝, 等. 基于小波能量矩的高阻接地故障检测方法[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(12): 161-168.
ZHU Xiaojuan, LIN Sheng, ZHANG Shu, et al. High-impedance grounding fault detection based on wavelet energy moment[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(12): 161-168.
- [12] 薛永端, 张秋风, 颜廷纯, 等. 综合暂态与工频信息的谐振接地系统小电流接地故障选线[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(24): 80-85.
XUE Yongduan, ZHANG Qiufeng, YAN Tingchun, et al. Faulty feeder identification based on combined transient and power-frequency components in resonant grounded systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(24): 80-85.
- [13] 索南加乐, 康小宁, 宋国兵, 等. 基于参数识别的继电保护原理初探[J]. 电力系统及其自动化学报, 2007, 19(1): 14-20.
SUONAN Jiale, KANG Xiaoning, SONG Guobing, et al. Survey on relay protection parameter identification[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2007, 19(1): 14-20.
- [14] 索南加乐, 杨钺, 宋国兵, 等. 模型识别用于继电保护的理初探[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(24): 23-29.
SUONAN Jiale, YANG Cheng, SONG Guobing, et al. Survey on relay protection model recognition[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(24): 23-29.
- [15] 索南加乐, 张超, 王树刚. 基于模型参数识别法的小电流接地故障选线研究[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(19): 65-70.
SUONAN Jiale, ZHANG Chao, WANG Shugang. Fault line selection in the non-solid earthed network based on the model identification method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(19): 65-70.
- [16] 索南加乐, 李宗朋, 王莉, 等. 基于频域参数识别方法的配电网单相接地故障选线[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(23): 93-97.
SUONAN Jiale, LI Zongpeng, WANG Li, et al. Fault line selection in the distribution networks based on the parameter identification method in frequency domain[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(23): 93-97.
- [17] 张超. 基于模型参数识别法的小电流接地故障选线研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2005.
- [18] 李广. 配电网单相接地故障区段定位研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2012.
- [19] 李乃成, 梅立泉. 数值分析[M]. 北京: 科学出版社, 2011.

收稿日期: 2016-12-28; 修回日期: 2017-03-29

作者简介:

徐铭铭(1985—), 男, 博士, 工程师, 研究方向为配电网运行分析; E-mail: xu_ming_ming@vip.sina.com

高淑萍(1970—), 女, 讲师, 博士, 主要研究方向为电力系统继电保护; E-mail: gao.sp2003@163.com

常仲学(1991—), 男, 通信作者, 博士研究生, 研究方向为电力系统继电保护. E-mail: changzhx@163.com

(编辑 张爱琴)